

УДК 62-868.8

В.Л. Хавин, канд. техн. наук, И.С. Лавриненко, Харьков, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРЕЦИЗИОННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ БИОПОЛИМЕРОВ

У даній роботі описана гістерезисна модель п'єзоелектричного приводу, яка за обраним домінуючим оператором відображає поведінку прецизійного актуатора у реальному часі при компенсації помилок в процесі механічної обробки біоінженерних полімерів. Результати чисельного моделювання нелінійного поведіння п'єзоелектричного приводу підтверджуються даними експериментальних досліджень.

В работе представлена математическая гистерезисная модель пьезоэлектрического привода, которая по выбранному доминирующему оператору отражает поведение прецизионного актуатора в режиме реального времени при компенсации ошибок позиционирования в процессах механической обработки биополимеров. Результаты численного моделирования нелинейного поведения пьезоэлектрического привода подтверждаются данными экспериментальных исследований.

This paper describes a piezoelectric actuator hysteresis model, which is chosen reflects the behavior of precision actuator with dominant operator in a real time scale for compensation errors in machining of bioengineered polymers. The results of numerical modeling of the nonlinear behavior of piezoelectric actuator are confirmed by experimental studies.

Постановка проблемы. Изделия из пьезоэлектрической керамики находят все более широкое применение для применения в системах управления исполнительными элементами механических систем. При этом, наряду с ультрапрецизионной точностью, достигается очень высокое быстродействие (вплоть до гиперзвуковой скорости воздействия). Одной из областей применений таких элементов является обеспечение контроля и корректировки прецизионных и ультрапрецизионных исполнительных механизмов, например, ультрапрецизионных механизмов подачи на станках высокой и сверхвысокой точности [1, 2]. При этом наличие гистерезисной нелинейности между входным напряжением и смещением на выходе сигнала создает инерционность и, следовательно, остаточное смещение относительно нулевого положения, значительно понижая точность приводов механизмов подачи прецизионных станков. Компенсация гистерезисной нелинейности пьезоэлектрического привода является очень важной задачей, решение которой позволит повысить точность работы исполнительных механизмов и других ультрапрецизионных устройств.

Анализ литературы. Исходя из результатов обзора литературных источников по проблеме корреляционных воздействий на элементы прецизионных механических систем, изделия из пьезоэлектрической керамики являются наиболее эффективными для приведения в действие различных рабочих элементов прецизионных и ультрапрецизионных исполнительных механизмов, которые требуют особо высоких показателей точности и быстродействия. Наиболее типичными представителями таких изделий являются пьезоэлектрические актуаторы [3, 4].

Существует несколько методов снижения гистерезисной нелинейности пьезоэлектрического привода. При отображении гистерезисной нелинейности как постоянного отставания по фазе можно, например, использовать компенсатор опережения по фазе, который обеспечивает постоянную опережающую составляющую фазы в определенном диапазоне частот, компенсаторы с прямой связью, параллельные компенсаторы и др. [5 - 9].

Цель статьи – разработка новой математической модели, которая более полно учитывает характеристики гистерезисной нелинейности пьезоэлектрических приводов. Применен параметрический метод планирования, который позволяет восстанавливать инерционность гистерезисных операторов, при изменении направления входного напряжения. При идентификации параметров модели для различных форм волны входного напряжения результаты моделирования полностью подтверждаются экспериментом. Предложенная модель включает все основные особенности гистерезисной нелинейности, включая главные и второстепенные циклы поведения пьезоэлектрического привода.

Модель пьезоэлектрического привода. На рис. 1 схематично показан пьезоэлектрический стандартный актуатор модели АП-К 20/2 АП ОАО "ВЗРД "Монолит", неизолированный защищенный, с влагостойким покрытием в металлическом корпусе, исполнение УХЛ.

Гистерезисная нелинейность привода моделируется в виде линейной и нелинейной части, в форме каскадной модели (рис. 2).

Механическая часть этого привода является линейным динамическим усилителем второго порядка. Предложенная модель пьезоэлектрического привода объединяет динамику актуатора с каскадной гистерезисной нелинейностью для пьезоэлектрического привода, V_{off} и L_{off} – начальное минимальное подаваемое напряжение и первоначальная длина пьезоэлемента соответственно.

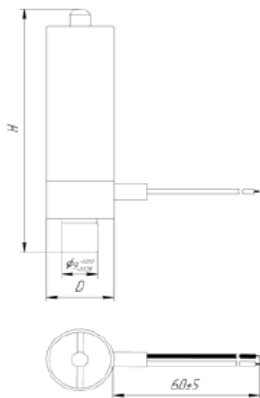


Рисунок 1 – Схема пьезоэлектрического актуатора модели АП-К 20/2

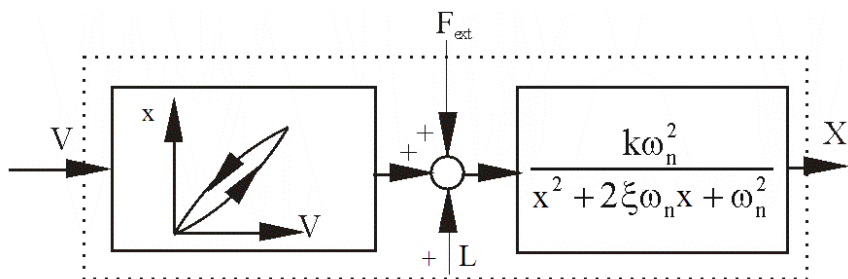


Рисунок 2 – Каскадная модель пьезоэлектрического привода

Уравнение каскадной модели имеет вид:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = k\omega_n(F_{\text{ext}} + L(V, V_{\text{off}}, L_{\text{off}})), \quad (1)$$

где x – перемещение;
 k – корректирующий параметр;
 $\omega_n = m^{-1}$
 ω_n – частота системы;
 ξ – коэффициентом затухания;

V – подаваемое напряжение;

F_{ext} – нормализованная внешняя сила, подаваемая на привод;

$L(V, V_{\text{off}}, L_{\text{off}})$ – каскадная нелинейная часть гистерезиса.

Смещение вывода L каскадной нелинейной части гистерезиса пьезоэлектрического привода может быть выражено следующим образом:

$$L = \sum_i k_i \left(1 - e^{-\tau_i |V - V_{\text{off}}|} \right) (V - V_{\text{off}}) + L_{\text{off}}, \quad (2)$$

где L_{off} – начальное положение системы;

V_{off} – начальное минимальное значение входного напряжения;

τ_i – фазовый коэффициент;

k_i – представляет минимальное (максимальное) гистерезисное смещение привода. Большая петля гистерезиса имеет $k_1 = 1$ и $k_2 = 2$, что соответствует первому циклу низшего порядка, второму и так далее (как показано на рис. 3).

Сравнение текущего входного напряжения с входными крайними членами пропорции предыдущего цикла показывает, выполнил ли привод пропуск предыдущего максимального или минимального экстремального значения входного напряжения. Если траектория входного напряжения передается сквозь один из предыдущих входных крайних членов пропорции, то гистерезис включает повтор предыдущего цикла, то есть будет продолжен текущий цикл.

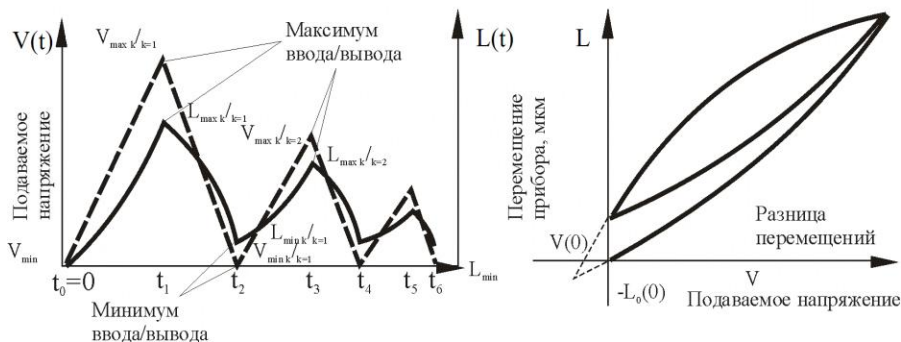


Рисунок 3 – Определение крайних членов пропорции ввода-вывода гистерезисной модели

На рис. 4 представлена графическая интерпретация полученных результатов моделирования в виде частотно-фазовой диаграммы работы привода, связанного с усилителем.

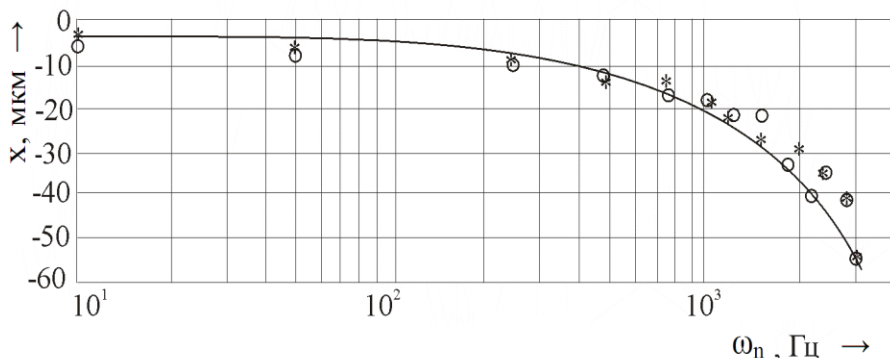


Рисунок 4 – Диаграмма линейной динамики работы привода
○ – $V = 25V$; * – $V = 50V$

Выводы.

1. Создана новая гистерезисная модель пьезоэлектрического актуатора, которая более полно учитывает характеристики гистерезисной нелинейности пьезоэлектрических приводов - актуаторов за счет того, что базируется на ряде гистерезисных операторов.

2. При идентификации параметров модели для различных форм волны входного напряжения моделирование полностью подтверждает экспериментальные результаты.

Список использованных источников: 1. Ерофеев А.А. Пьезоэлектрические устройства автоматизации / А.А. Ерофеев – Л.: Машино-строение, 1982. – 212с. 2. Смирнов А.Б. Мехатроника и робототехника. Системы микропере-мещений с пьезоэлектрическими приводами; Учеб. пособие / А.Б. Смирнов – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 160 с. 3. Шарпов В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарпов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарпова. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с. 4. Бобцов А.А. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений / Бобцов А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В. – СПб: ГУ ИТМО, 2011. – 131 с. 5. Бойков В.И. Экспериментальное исследование характеристик пьезопроводов нового поколения / Бойков В.И., Быстров С.В., Коровяков А.Н., Салмыгин И.П. – Изв.вузов. Приборостроение, 2009. – Т.52. – №11. – С.77–82. 6. Липанов А.М. Инерционный пьезоэлектрический шаговый привод субнанометровой точности / Липанов А.М., Гуляев П.В., Шелковников Е.Ю., Тириков А.В. // ПТЭ – 2009. – №5. – С. 121–122. 7. Advances in Optimization and Control / B.A. Eiselt and G. Pederoli. Berlin: Springer, 1988. – 437 p. 8. The NanoPositioning Book / T.R. Hicks, P.D., Atherton, Y. Xu, M. McConnell. – Queensgate Instruments Ltd, 1997 – 119 p. 9. Chang S.H. Tseng C.K. Chien H.C. An ultra-precision XYC-) piezo-micropositioner // IEEE Trans Ultrasonic Ferroelectrics Frequency Control – Part I: Design and Analysis, 1999. – 46(4). – P. 897–905.

Поступила в редколлегию 19.06.2013